

## ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТУРБУЛЕНТНОГО ГОРЕНИЯ В КС ГТУ

## REVIEW OF MODERN MODELING METHODS OF TURBULENT COMBUSTION PROCESSES AT GAS-TURBINE COMBUSTOR

Южаков И. В., Левин Е. И.

Уральский федеральный университет, г.Екатеринбург,  
iuzhakov.ivan@yandex.ru

Uzhakov I. V., Levin E. I.

Ural Federal University, Ekaterinburg

**Аннотация:** Проведен обзор различных методов моделирования процессов горения в камерах сгорания газотурбинных установок (КС ГТУ). Определены математические условия и ограничения существующих методов, выделены наиболее эффективные модели:  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$  и  $LES$ . Определены основные преимущества и недостатки рассматриваемых методов. Описаны результаты их моделирования, а именно получены характеристики турбулентного потока и градиенты параметров, а также изучены особенности КС и режимов горения.

**Abstract:** The review of various modeling methods combustion processes in the combustion chambers of gas turbine units (CC GTU) was conducted. The mathematical conditions and limitations of existing methods are determined, the most effective models are identified:  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$  and  $LES$ . The main advantages and disadvantages of the methods are determined. The results of their modeling are described, namely the obtained turbulent flow and the gradients characteristics of the parameters, as well as the studied features of the CS and combustion regimes.

**Ключевые слова:** моделирование, турбулентное горение, камера сгорания, ГТУ, уравнения Навье-Стокса

**Key words:** *modeling, turbulent combustion, combustion chamber, gas turbine installation, Navier-Stokes equations*

Основные тенденции в развитии современной российской теплоэнергетики связаны с повышением эффективности сжигания топлива, а именно усовершенствования существующих энергоустановок и разработки новых устройств. Наиболее эффективными разработками на данный момент являются парогазовые установки (ПГУ), массово внедряемые в современную промышленность.

Конструкционное исполнение ПГУ включает в себя камеру сгорания (КС) газовой турбины (ГТУ). Эффективность ГТУ может быть повышена за счет исследования турбулентного горения топлива в КС. С целью сокращения материальных и временных затрат для исследования применяется численное моделирование процессов горения, наиболее точными и распространенными из которых являются  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$  и  $LES$  модели.

Целью данного исследования является изучение различных систем моделирования турбулентного горения для дальнейшего выбора наиболее подходящей математической системы, отвечающей требованиям проектируемых КС ГТУ.

### *1. Основание выбора модели горения*

Горение в КС ГТУ характеризуется большими градиентами параметров, интенсивностью закрутки сжигаемых потоков и высоким уровнем турбулентности. Выбор модели горения зависит от характера турбулентного потока, требуемой точности, доступных вычислительных и временных ресурсов. В практике инженерных расчётов широко используются модели, базирующиеся на осреднённых по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса (RANS), в частности, моделях семейств  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$ ,  $LES$ .

Модели  $k-\varepsilon$  имеют большое число модификаций, таким образом, данный тип моделирования применим, как к центральной части турбулентного потока, так и в пограничном слое.

При моделирование  $k-\omega$  решается уравнение для скорости диссипации турбулентной энергии. Данная система моделирования наиболее удобна для пограничных слоев и КС сложной геометрии.

В моделях  $LES$  крупные вихри рассчитываются аналогично методу прямого численного моделирования ( $DNS$ ), а мелкие диссипативные вихри учитываются уравнениями движения вязкой жидкости. Данный метод является ресурсоемким, в связи с чем применяется только для сложных систем, требующих высокой точности.

## *2. Верификация систем моделирования.*

*Система  $k-\epsilon$ .* Для данной модели характерны высокая точность, малые затраты вычислительных мощностей и широкий диапазон применимости. Недостатком данной модели является неопределенность в описании турбулентных потоков пограничного слоя КС сложной геометрии.

Успешное использование модели  $k-\epsilon$  отмечено для моделирования эмиссионных характеристик и температурных полей в камере сгорания, для исследования градиента скоростей и концентраций, определения зоны тепловыделения [1]. Теоретические исследования процессов горения посредством системы  $k-\epsilon$  были проведены для модели камеры сгорания с вводимыми осевыми и вихревыми потоками и пристенной струей [2]. В каждом из приведенных случаев, моделирование типа  $k-\epsilon$  показывало высокую точность и соответствие опытным данным.

*Система  $k-\omega$ .* Математически более сложная модель  $k-\omega$  применима только к описанию турбулентности в пограничном слое, что связано с характерной для пристеночной области скоростью диссипации энергии.

Система  $k-\omega$  позволяет отразить форму потоков со сложной закруткой и сильным градиентом температур. Высокая точность результатов моделирования позволяет выполнить оптимизацию режима горения и определить необходимые условия для минимизации производства энтропии [3].

Система  $k-\omega$  в некоторых случаях применяется для малых камер сгорания со сложной геометрией для описания турбулентности не только в пограничном слое, но и в центральной части КС [1], а также для исследования потоков в трубах малого диаметра.

*Система LES.* Моделирование методом *LES* применяется для стационарных и нестационарных моделей горения [4]. Так система *LES* позволяет моделировать градиенты температуры и скорости потоков, исследовать поля давления и концентраций, определять коэффициент избытка воздуха в зоне горения, а также изучать акустические процессы в КС различных типов [5].

Особенностями вышеперечисленных систем являются высокая турбулентность потоков в КС, сложность геометрии камеры сгорания и высокие требования к точности вычислений, что и обуславливает использование модели *LES*.

В данной работе приведены наиболее распространенные для прикладного моделирования математические системы турбулентных процессов. Основываясь на свойствах и известных параметрах реальных физических систем, может быть осуществлен выбор математической модели, обеспечивающей требуемую точность и минимальные затраты вычислительных ресурсов.

#### Список использованных источников

1. Эмиссионные характеристики и температурная неравномерность на выходе из камеры сгорания ГТУ/ А. Н. Сабирзянов, Б. В. Явкин, Ю. Б. Александров, А. Н. Маркушин, А. В. Бакланов // Вестник СГАУ. 2013. № 3 (41). Ч. 2. С. 165–172
2. A parametric study on the factors affecting gas turbine combustion using a CFD-based approach / F. Shirinzadeh, R. M. Barough, A. A. Orang // Bulgarian Chemical Communications. 2015. Vol .47. P. 231–238.
3. An investigation of air-swirl design criteria for gas turbine combustors through a multi-objective CFD optimization / M. Torkzadeh, F. Bolourchifard, E. Amani // Fuel. 2016. № 186. P. 734–749.
4. Computational modeling of the working process in the combustion chamber for casing-head gas recovery / N. L. Bachev // Journal of Engin. Thermophysics. 2016. Vol. 89. № 1. P. 221–229.
5. Acoustic of turbulent non-premixed syngas combustion. Proefschrift / P. Sjoerd. Enschede, The Netherlands, 2007. P. 205.